

봉의꼬리를 이용한 논토양의 비소정화에 미치는 차광처리의 영향

권혁준, 조주성, 이철희*

충북대학교 원예과학과

Effect of Shading Treatment on Arsenic Phytoremediation Using *Pteris multifida* in Paddy Soil

Hyuk Joon Kwon, Ju Sung Cho and Cheol Hee Lee*

Department of Horticultural Science, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

Abstract - This study was conducted to analyse the effectiveness of shading on growth and arsenic absorption of *Pteris multifida*, known as hyperaccumulator of arsenic, from paddy soils contaminated with heavy metals. Study was carried out in paddy soil polluted by arsenic near the former Janghang smelter. *P. multifida* in the same growth stage was planted with 20×20 cm intervals in each experimental plot (2×2 m), and cultivated for 24 weeks. The growth of *P. multifida* according to shading conditions was evaluated, the accumulated amount of arsenic in plants and arsenic variation in the soil was analyzed using ICP. In the result of this study, the growth of *P. multifida* cultivated under shading treatment was vigorous than non-shading. Accumulated amount of arsenic in aerial parts of *P. multifida* cultivated under non-shading (169.8 mg·kg⁻¹) was slightly higher than shading (140.9 mg·kg⁻¹), and those in underground part were almost the same. But the growth was great in 70% shading treatment. Therefore, arsenic contents absorbed from soils was much higher in shading treatment. Arsenic translocation rate (TR) of *P. multifida* was very high (0.87~0.89) regardless of shading conditions. So arsenic in soil could be efficiently eliminated by removal of aerial parts.

Key words - Arsenic, Janghang, Smelter, Hyperaccumulator, Heavy metal

서 언

급속한 산업발달 및 도시화에 의한 다양한 형태의 오염 물질들이 크게 증가하고 있다. 지구 온난화, 오존층 파괴, 산성비 강하 등의 문제가 날로 심각해지고 있다. 특히 다양한 형태의 유독성 중금속 원소를 비롯한 오염물질들은 인위적으로 생성, 배출된다. 이들은 물, 대기, 토양 등의 이동매체를 통하여 수권, 대기권, 토양권, 생물권을 포함하는 지구화학적 환경으로 분산됨에 따라 잠재적으로 인간을 비롯한 유기 생명체에게 치명적인 피해를 입히고 있다(Alloway, 1995). 국내에서도 수질, 공기, 토양의 오염에 따른 피해가 점차 증가하고 있으며, 특히 휴폐광산 지역의 오염물질 유출로 인한 문제가 대두되고 있다(Park, 1994).

비소는 피부암과 폐암에 대하여 1급 발암물질로 평가된

다(Boffetta, 1993). 미국, 스웨덴, 독일에서는 역학조사에 의해 제련소나 양조장 등 작업장에서 비소의 노출에 의하여 폐, 간, 신장, 위장 등의 암으로 인한 사망과 상관관계가 있다고 보고되었다(Tokudome and Kuratsune, 1976; Enterline and Marsh, 1982; Jarup and Pershagen, 1991).

중금속 오염이 사회적인 문제로 대두되면서 국가에서는 오염부지의 정화사업을 실시하고 있다. 오염된 토양의 정화방법에는 크게 물리적, 화학적 및 생물학적, 열처리 방법 등으로 분류할 수 있다(Salt *et al.*, 1995, Kim and Lee, 1999). 정화방법 중 물리·화학적 처리기술은 고비용 및 2차적인 오염 문제를 유발하여 환경적인 기술을 이용하여 보다 경제적이고 유해성이 나타나지 않는 장점을 앞세운 식물을 이용한 토양 내 중금속을 정화하는 생물학적 처리기술인 식물상 정화기술(phytoremediation)에 관심이 높아가고 있다(Jung *et al.*, 2002). 식물재배정화법은 식물을 이용하여 오염된 토양 및 퇴적층, 지하수를 포함한 수질 등을

*교신저자(E-mail) : leech@chungbuk.ac.kr

정화시키는 친환경적인 in-situ 정화기술이다(EPA, 2000).

중금속으로 오염된 (구)장항제련소 인근에서 붕의꼬리 (*Pteris multifida*)의 비소 축적률이 밭에서 $96.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 논에서 $100.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 수림지에서 $1,121.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 (구)장항제련소에 현장 적용이 가능한 것으로 보고되었다 (Ju, 2011). 특히 수림지에서 붕의꼬리의 비소 흡수능이 매우 우수한 것으로 분석되었는데, 이는 붕의꼬리가 무차광보다 35~75%의 차광조건에서 초장의 신장이 우수하며, 엽장, 엽폭도 같은 경향으로 차광 재배하는 것이 생육에 우수하였기 때문으로 생각된다(Suh *et al.*, 2006). 그러나 (구)장항제련소 인근의 오염지역은 대부분 논토양으로 차광에 따른 붕의꼬리의 생육 및 비소 흡수능 연구가 필요한 실정이나 이에 관한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구는 비소 흡수능이 우수한 붕의꼬리를 차광정도를 달리하여 재배함으로써 붕의꼬리의 생육과 비소 흡수능을 분석하여 효과적인 식물정화공법을 개발하고자 수행하였다.

재료 및 방법

비소 흡수능이 우수한 것으로 알려진 붕의꼬리(Du *et al.*, 2005; Ju, 2011; Oh, 2005; Wang *et al.*, 2006, 2007; Wei *et al.*, 2007)는 생육단계가 동일하며, 균일한 유묘를 선택하여 사용하였다(Tables 1 and 2). 비소의 오염이 심각한 것으로 알려진 (구)장항제련소 인근의 논토양에서 연구를 수행하였다. 각 실험구의 크기는 $2\times 2 \text{ m}$ 로 조성하였다. 식물을 식재하기 위하여 실험부지를 경운한 다음 물빠

짐을 돕기 위하여 배수로를 조성하였다. 차광 처리구는 3 m의 활대를 이용하여 70% 차광막을 설치하였다. 붕의꼬리는 2010년 4월 26일에 $20\times 20 \text{ cm}$ 의 재식간격으로 식재하여 24주간 재배하였다. 식물을 식재한 다음 활착을 돕기 위하여 2주간 관수하였다. 모든 시험구는 완전임의배치 3반복으로 배치하였다.

채취한 토양시료는 음건하여 나무망치로 분쇄한 다음 눈금간격 0.15 mm(100 mesh)로 체걸음 하였다. 체걸음 한 시료는 사분법에 의해 균일하게 혼합한 다음 분석용 시료로 사용하였다.

전함량법으로 토양의 중금속 함량을 분석하였다. 분석용 토양 시료 3 g을 250 mL 반응용기에 넣은 다음 약 0.5~1 mL의 물로 시료를 적신 후 질산 7 mL과 염산 21 mL를 첨가하였다. 흡수용기에 질산(0.5 M) 15 mL를 넣고 흡수용기와 환류냉각관을 반응용기에 연결시켰다. 연결한 흡수용기는 상온에서 2시간 이상 정치시킨 다음 반응혼합물의 온도를 서서히 올려 분해시킨 후 냉각시켰다. 흡수용기의 내용물은 환류냉각관을 통하여 반응용기로 옮겨졌으며, 흡수용기와 환류냉각관의 잔여물은 질산(0.5 M) 10 mL를 이용하여 반응용기에 넣어주었다.

식물재료는 습식분해법으로 전처리하여 중금속 함량을 분석하였다. 지상부와 지하부로 나눈 식물체를 60°C 의 건조기(Hanbaek Scientific Co., Korea)에서 72시간 건조한 다음 분쇄하였다. 분쇄한 식물시료 0.5 g을 분해용 삼각플라스크에 넣고 황산(H_2SO_4) 1 mL과 50%의 과염소산(HClO_4) 9 mL를 첨가한 다음 $310^\circ\text{C} \sim 410^\circ\text{C}$ 의 열판에서 분해시켰다. 분해가 끝나면 냉각시킨 후 No. 6 여과지로

Table 1. Growth state of *Pteris multifida* used for this study

Plant height (cm)	Plant width (cm)	No. of leaves/plant (ea)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Root length (cm)
6.3 ± 0.29^z	6.6 ± 0.52	5.8 ± 0.51	3.8 ± 0.21	2.9 ± 0.26	3.9 ± 0.48

^zValues are mean \pm SE (n=10).

Table 2. Fresh and dry weight of *Pteris multifida* used for this study

Fresh wt. (g)			Dry wt. (g)		
Aerial part	Underground part	Total	Aerial part	Underground part	Total
0.2 ± 0.02^z	0.1 ± 0.01	0.3 ± 0.03	0.1 ± 0.01	0.0 ± 0.00	0.1 ± 0.01

^zValues are mean \pm SE (n=10).

50 mL mass flask에 여과하여 사용하였다.

전처리한 토양 및 식물의 시료는 유도결합플라즈마-원자발광분광법으로 유도결합플라즈마분광도계(Perkin Elmer optima 5300DV ICP-AES, Perkin Elmer)를 이용하여 유도결합플라즈마-원자발광분광법으로 비소(As)의 함량을 측정하였다. 또한 식물이 흡수한 중금속이 지하부에서 지상부로 이동되는 이동계수(translocation rate, TR)를 아래의 식을 이용하여 구하였다.

채취한 토양시료를 직사광선이 닿지 않는 장소에서 균일한 두께로 펼쳐놓아 통풍이 잘되게 한 다음 음건시켰다. 음건한 토양을 나무망치로 분쇄하여 눈금간격 0.15 mm(100 mesh)로 체걸음을 하였다. 체걸음 한 시료를 각 200 g씩 취하여 사분법에 의해 균일하게 혼합한 다음 분석용 시료로 사용하였다.

전함량법으로 토양의 중금속 함량을 분석하기 위하여 다음의 방법으로 전처리하였다. 분석용 시료 3 g을 250 mL 반응용기에 넣고 약 0.5~1 mL의 물로 시료를 적신 후 염산 21 mL과 질산 7 mL를 첨가하였다. 흡수용기에 0.5 M의 질산 15 mL를 넣은 다음 흡수용기와 환류냉각관을 반응용기에 연결시켰다. 환류냉각관과 연결한 흡수용기는 상온에서 2시간 이상 정치시켜 토양 내의 유기물이 천천히 산화되도록 한 후 반응혼합물의 온도를 서서히 올려 분해시켰다. 반응혼합물의 분해가 끝난 후 반응용기를 냉각시켰다. 흡수용기의 내용물을 환류냉각관을 통하여 반응용기로 옮겼으며, 흡수용기와 환류냉각관의 잔여물은 0.5 M 질산 10 mL를 이용하여 반응용기에 넣어주었다.

식물재료는 습식분해법으로 전처리하여 식물체의 중금속 함량을 분석하였다. 식물을 지상부와 지하부로 나누어 60°C의 건조기(Hanbaek Scientific Co., Korea)에서 72 시간 건조하여 분쇄하였다. 분쇄한 식물시료를 0.5 g을 분해용 △ flask에 넣고 H₂SO₄ 1 mL와 50% HClO₄ 9 mL를 첨가한 다음 열판에 놓고 310°C ~ 410°C에서 분해시켰다. 분해가 끝나면 냉각시켜 No.6 여과지를 사용하여 50 mL mass flask에 여과하여 사용하였다.

전처리한 토양 및 식물의 시료는 유도결합플라즈마분광도계 (Perkin Elmer optima 5300DV ICP-AES, Perkin Elmer)를 이용하여 유도결합플라즈마-원자발광분광법으로 비소(As)의 함량을 측정하였다. 또한 식물이 흡수한 중금속이 지하부에서 지상부로 이동되는 이동계수(translocation rate, TR)를 아래의 식을 이용하여 구하였다.

$$\text{Translocation rate (TR)} = \frac{\text{지상부의 중금속 축적량}}{\text{지상부+지하부의 중금속 축적량}}$$

중금속 함량은 3반복을 1회로 3회 반복 측정하였으며, 식물의 생육은 처리구당 10개체씩 3반복으로 조사하였다. 통계처리는 SAS version 9.1(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 이용하여 평균과 표준오차를 구하였다. 던컨의 다중검정방법(Duncan's multiple range test)을 이용하여 $p < 0.05$ 의 수준에서 처리구간의 유의성을 검정하였다.

결과 및 고찰

실험 전 토양의 비소 함량

연구에 사용한 논토양의 비소함량은 Table 3과 같이 거의 유사하였다. 따라서 본 연구에서 봉의꼬리가 흡수한 비소의 함량 및 토양에서 제거된 비소의 함량은 식재한 토양의 비소농도의 차이가 아닌 차광처리에 의한 것임을 알 수 있었다.

실험 전 봉의꼬리의 비소 함량

비소로 오염된 토양에 식재하기 전 원예용 상토에서 재배한 봉의꼬리에도 비소가 함유되어 있었다(Table 4). 이는 봉의꼬리가 비소 과축적 식물로 원예용 상토에 함유된 미량의 비소를 흡수하여 축적하고 있기 때문으로 생각된다 (Srivastava *et al.*, 2006; Zhang and Cai, 2002).

Table 3. Arsenic contents of each paddy soils used for this study

Treatment	As content in soil (mg·kg ⁻¹)
Non-shading	41.4 ± 4.20 ^z
Shading	45.6 ± 1.34

^zValues are mean±SE (n=3).

Table 4. Arsenic contents of *Pteris multifida* used for this study

As content/plant (mg·kg ⁻¹)	
Aerial part	Underground part
1.61 ± 0.72 ^z	21.30 ± 1.341

^zValues are mean±SE (n=3).

차광조건에 따른 봉의꼬리의 생육

차광조건을 달리하여 24주간 재배한 결과, 무차광 처리구에 비해 차광 70% 처리구에서 봉의꼬리의 생육이 더 우수하였다(Table 5). 특히 초장과 엽폭이 차광처리구가 무차광구에 비해 컸다. 이는 차광정도가 높을수록 초장과 엽폭이 증가한다는 Kim and Lee(1978) 및 Seo 등(2002)의 연구결과와 일치하였다.

또한 차광처리하여 재배한 봉의꼬리는 무차광 처리구에 비해 지상부의 생체중이 2.4배, 전체중이 0.7배, 지하부의 생체중과 전체중이 각 0.5배 높았다(Table 6). 차광처리가 광도를 낮추어 주어 여름철의 기온 및 지온의 상승을 억제함으로써 봉의꼬리의 생육을 향상시키는 것으로 생각된다(Moon and Pyo, 1981). 음생식물은 자연광의 20~25%에서 생육이 왕성해지는 것으로 알려져 있으나(Boardman, 1977; Burkholder, 1936; Isanogle, 1944), 봉의꼬리는 35~75% 차광에서 생육이 우수한 중생식물로 알려져 있다(Suh *et al.*, 2006). 본 연구에서도 차광처리시 생육이 우수하였으며, 무차광에서도 생육이 가능한 것으로 확인되었다.

봉의꼬리는 숲 속 또는 길가의 절벽이나 돌담에서 자생하며(Kor. Fern Soc., 2005), 배수성과 통기성이 우수한 토양에서 생육이 우수한 것으로 알려져 있다(Suh *et al.*, 2006). 실험 부지의 배수를 향상시키기 위해 배수로를 만들었으나 논토양의 특성상 배수성과 통기성이 낮아 봉의꼬리의 생육이 전반적으로 저조하였다. 또한 봉의꼬리는 분화 재배시 배양토는 피트모스:이끼(5:5) 조합의 배수성과 통기성이 우수한 토양에서 가장 생육이 좋았다(Suh *et al.*, 2006). 따라서 배수로 정비 및 토양개량제를 통해 배수성과 통기성을 향상시킨다면 봉의꼬리의 생육이 크게 향상될 것으로 기대된다.

차광조건에 따른 봉의꼬리의 비소 흡수능

봉의꼬리의 지상부 및 지하부의 비소 축적량은 무차광 재배시 각 169.8, 20.3 mg·kg⁻¹였으며, 차광처리에서는 각 140.9와 21.5 mg·kg⁻¹를 축적되었다(Table 7). 봉의꼬리 지하부의 비소 축적량은 차광에 관계없이 비슷하였으며, 지상부는 무차광 처리구에서 다소 많았으나 통계적으로 유의하지는 않았다. 봉의꼬리는 차광에 따라 식물의 생

Table 5. Effect of shading treatment on growth of *Pteris multifida* cultivated in paddy soil for 24 weeks

Treatment	Plant height (cm)	Plant width (cm)	No. of leaves/plant (ea)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Root length (cm)
Non-shading	6.5b ^z	9.8a	10.3a	9.8a	4.8a	7.5a
Shading	12.1a	9.8a	7.3a	13.5a	4.8a	5.9a

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test, $p < 0.05$.

Table 6. Effect of shading treatment on fresh and dry weight of *Pteris multifida* cultivated in paddy soil for 24 weeks

Treatment	Fresh wt. (g)			Dry wt. (g)		
	Aerial part	Underground part	Total	Aerial part	Underground part	Total
Non-shading	0.7a ^z	0.4a	1.1a	0.6b	0.2a	0.7b
Shading	1.7a	0.6b	2.3a	1.0a	0.3a	1.3a

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test, $p < 0.05$.

Table 7. Effect of shading treatment on Arsenic contents of *Pteris multifida* cultivated in paddy soil for 24 weeks

Treatment	As content/plant (mg·kg ⁻¹)		TR ^z
	Aerial part	Underground part	
Non-Shading	169.8a ^y	20.3a	0.89a
Shading	140.9a	21.5a	0.87a

^zTR: Translocation rate (ratio of arsenic in aerial parts to underground parts).

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, *p*<0.05.

Table 8. Effect of shading treatment on Arsenic contents of *Pteris multifida* from 1 m² soil for 24 weeks

Treatment	As absorption from soil (mg/m ²)	
	Aerial part	Underground part
Non-Shading	3.4a ^z	0.1a
Shading	5.0a	0.2a

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test, *p*<0.05.

육차이가 발생하였으며, 광합성 능력, 호흡, 단백질 합성 등 작물대사의 변화가 달라 비소 흡수량에도 영향을 준 것으로 생각된다(Yoo and Kim, 1997; Weaver and Clements, 1996).

동일 면적(1 m²)에서 차광조건에 따른 봉의꼬리의 건물 중 생산량과 비소 축적량을 분석하여 흡수한 비소량을 분석한 결과, 통계적으로 유의하지는 않지만 차광 처리구에서 흡수한 비소의 함량이 많았다(Table 8). 본 연구지와 동일한 (구)장항제련소 인근의 비소 오염도와 차광정도가 비슷한 수립지에서 실시한 Ju(2011)의 연구에 의하면 봉의꼬리 지상부의 비소 흡수량이 1,121.68 mg·kg⁻¹로 매우 우수하였으나 본 연구에서 이용한 논토양의 경우에는 140.9~169.8 mg·kg⁻¹로 다소 낮았다. 이는 수립지의 토양이 사질 토양으로 배수성과 통기성이 원활하여 봉의꼬리의 생육이 우수하여 비소의 흡수능이 또한 높은 것으로 생각된다. 따

라서 논토양 정화를 위해선 경운 및 배수로 설치 등을 통해 배수성과 통기성을 향상시키기 위한 노력이 필요하다. 또한 회양목 등의 비소 축적률이 높은 목본류(Jung, 2001) 및 다양한 중금속 흡수능이 우수한 것으로 알려진 쑥(Kim *et al.*, 1999), 벌개미취(Ju *et al.*, 2011)등과 함께 식재하여 봉의꼬리의 생육에 적당한 차광조건을 조성한다면 비소의 흡수량 및 생육이 크게 향상될 것으로 생각된다.

차광조건을 달리하여 봉의꼬리를 재배한 토양의 비소함량 변화

무차광에 비해 차광처리하여 봉의꼬리를 재배한 토양에서 제거된 비소가 많았는데, 이는 차광조건에서 건물생산량이 많았기 때문으로 생각된다(Table 9). 한편 본 연구에서는 토양에서 제거된 비소의 함량이 적은 편이었는데, 이는 논토양에서 잦은 강우와 바람에 의한 비소의 확산현상

Table 9. Effect of shading treatment on Arsenic content changes of soils used for cultivation of *Pteris multifida* for 24 weeks

Treatment	As contents in soil (mg·kg ⁻¹)		Changing amount of As contents in soil (mg·kg ⁻¹)
	Before planting	After planting	
Non-shading	41.4 ± 4.20 ^z	39.9 ± 4.14	-1.5b ^y
Shading	45.6 ± 1.34	43.4 ± 2.55	-2.3a

^zValues are mean±SE (n=3).

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, *p*<0.05.

으로 인하여 인근 토양에서 비소가 유입될 가능성이 높기 때문에 생각되었다. 특히 본 연구에서 사용한 실험부지는 2×2 m로 매우 작았으므로, 주변에서 비소가 많이 유입되었을 것으로 생각된다. 따라서 차후 넓은 곳에서 봉의꼬리를 식재할 경우 주변에서 비소가 유입될 확률이 적어 정화되는 비소의 양이 증가될 것으로 생각된다.

적 요

본 연구는 중금속으로 오염된 논토양에서 비소 흡수능이 우수한 봉의꼬리(*Pteris multifida*)를 재배할 때 차광처리가 봉의꼬리의 생육과 토양 내 비소 흡수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수행하였다. 비소로 오염된 (구)장항제련소 인근의 논토양에서 수행하였으며, 각 실험구의 크기를 2×2 m로 조성하였고, 동일한 생육단계의 봉의꼬리를 20×20 cm 간격으로 식재하여 24주간 재배하였다. 차광조건에 따른 봉의꼬리의 생육을 조사하였고, 식물체 내 비소 축적량 및 토양의 비소 변화량은 ICP를 이용하여 분석하였다. 연구의 결과, 중금속으로 오염된 논토양에서 차광에 의한 봉의꼬리의 생육은 무차광에 비해 차광 처리구에서 왕성하였다. 봉의꼬리 지상부의 비소 축적량은 차광(140.9 mg·kg⁻¹)에 비해 무차광 처리구(169.8 mg·kg⁻¹)에서 다소 높았으며, 지하부의 비소 축적량은 비슷한 경향을 보였다. 그러나 생육은 70% 차광 처리구에서 월등히 우수하여, 토양에서 흡수한 비소의 함량은 차광처리구에서 오히려 더 많았다. 봉의꼬리의 비소 이동계수(TR)는 차광처리에 관계없이 0.87~0.89로 매우 높아 흡수한 비소를 지상부로 빠르게 이동시키므로 생육 후 지상부의 제거처리에 의해 토양 내의 비소를 효과적으로 제거할 수 있으리라 생각된다.

인용문헌

Alloway, B.J. 1995. Heavy Metals in Soils. Blackie Academic and Professional, London, UK. p. 354.
 Boardman, N.K. 1977. Comparative photosynthesis of sun and shade plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 28:355-377.
 Boffetta, P. 1993. Carcinogenicity of trace elements with reference to evaluations made by the international agency for research on cancer. Scand. J. Work Environ. Health 19:67-70.
 Burkholder, P. 1936. The role of light in the life of plants. Bot. Rev. 2:1-53.

Choi, K.O. 2007. The growth responses and photosynthetic activity of autogenous evergreen fern under light intensity. J. Kor. Soc. People Plants Environ. 10(4):1-8 (in Korean).
 Du W.B., Z.A. Li, B. Zou and S.L. Peng. 2005. *Pteris multifida* Poir., a new arsenic hyperaccumulator: characteristics and potential. Int. J. Environ. Pollut. 23:388-396.
 Enterline, P.E. and G.M. Marsh. 1982. Cancer among workers exposed to arsenic and other substances in a copper smelter. Am. J. Epidemiol. 116:895-911.
 EPA. 2000. Introduction to phytoremediation. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S.
 Isanogle, I.J. 1944. Effect of controlled shading upon the development of leaf structure in two deciduous tree species. Ecology 25:404-413.
 Jarup, L. and G. Pershagen. 1991. Arsenic exposure, smoking, and lung cancer in smelter workers—a case-control study. Am. J. Epidemiol. 134:545-551.
 Ju, Y.K. 2011. Selection of plants for phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. M.S. Diss., Chungbuk Nat. Univ., Cheongju. (in Korean).
 Ju, Y.K., H.J. Kwon, J.S. Cho, S.L. Shin, T.S. Kim, S.B. Choi and C.H. Lee. 2011. Growth and heavy metal absorption capacity of *Aster koraiensis* Nakai according to types of land use. Korean J. Plant Res. 24(1):48-54 (in Korean).
 Jung, G.B., W.I. Kim, J.S. Lee and K.M. Kim. 2002. Phytoremediation of soils contamination with heavy metal by long-term cultivation. Kor. J. Environ. Agri. 21:31-37 (in Korean).
 Kim, J.G. and S.H. Lee. 1999. Phytoremediation, Proc. Symp. 'Remediation Technology'. Kor. Soc. Environ. Agric. 29: 58-88 (in Korean).
 Kim, J.G., S.K. Lim, S.H. Lee, Y.M. Yoon, C.H. Lee and C.Y. Jeong. 1999. Evaluation of heavy metal pollution and plant survey around inactive and abandoned mining areas for phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Kor. Soc. Environ. Agric. 18(1):28-34 (in Korean).
 Kim, Y.J., and J.S. Lee. 1978. Studies on the exploitation of shade tolerant ground-cover plants (1): growth behavior of several ground covers under controlled shadings. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 19:167-171 (in Korean).
 Kor. Fern Soc. 2005. Fern and fern allies of Korea. Geobook. p. 152 (in Korean).
 Lee, J.Y. 2008. Development of organic and inorganic acid-based soil washing system for heavy metals contaminated

- soil and feasibility study. Ph.D. Diss. Hanyang Univ. Seoul. (in Korean).
- Moon, W. and H.K. Pyo. 1981. Effects of various levels of shade on the growth of some cool season vegetables. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 21:153-159 (in Korean).
- Oh, W.K. 2005. A feasibility study on *Pteris multifida* piur. for the phytoremediation of arsenic contaminated mine soil. MS Diss., Seoul Univ., Seoul.
- Park, Y.H. 1994. Management practices of inactive and abandoned metalliferous mine areas in Korea. Kor. Environ. Technology & Research. KETRI/1994/RE-14, Seoul, Korea (in Korean).
- Salt, D.E., M. Blaylock, N.P.B.A. Kumar, S. Dushenkov, B.D. Ensley, I. Chet and I. Raskin. 1995. Phytoremediation. A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Bio. Tech. 13:468-474.
- Srivastava, M., L.Q. Ma and J.A.G. Santos. 2006. Three new arsenic hyperaccumulating ferns. Sci. Total Environ. 364: 24-31.
- Suh, J.T., D.L. Yoo, H.S. Lee, C.W. Nam and S.J. Kim. 2006. Effects of culture soil combinations on growth of *Pteris multifida*, *Cyrtomium falcatum* and *Cheilanthes argentea*. Korean J. Plant Res. 19:517-520 (in Korean).
- Suh, J.T., D.L. Yoo, H.S. Lee, C.W. Nam, S.J. Kim and W.B. Kim. 2006. Effects of shading degree on the growth of Pteridophyte on rain-shelter. Kor. J. Interior Landscape 8(2):23-27 (in Korean).
- Tkumome, S. and M. Kuratsune. 1976. A cohort study on mortality from cancer and other causes among workers at a metal refinery. Int. J. Cancer 17:310-317.
- Wang, H.B., Z.H. Ye, W.S. Shu, W.C. Li, M.H. Wong and C.Y. Lan. 2006. Arsenic uptake and accumulation in fern species growing at arsenic-contaminated sites of Southern China: field surveys. Int. J. Phytoremediation 8:1-11.
- Wang, H.B., M.H. Wong, C.Y. Lan, A.J.M. Baker, Y.R. Qin, W.S. Shu, G.Z. Chen and Z.H. Ye. 2007. Uptake and accumulation of arsenic by 11 *Pteris* taxa from southern China. Environ. Pollut. 145:225-233.
- Weaver, J.E. and F.E. Clements. 1966. Plant ecology. McGraw-Hill Publishing Co., New York, USA.
- Wei, C.Y., C. Wang, X. Sun and W.Y. Wang. 2007. Arsenic accumulation by ferns: a field survey in southern China. Environ. Geochem. Health 29:169-177.
- Yoo, Y.K. and K.S. Kim. 1997. Effects of shading on the growth in *Hibiscus syriacus* L. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 38:520-526 (in Korean).
- You, J.H., Y.H. Jin, H.W. Won and C.H. Lee. 2005. Effect of shading ratio on growth of Korean native ferns. J. Kor. Flower Res. Soc. 13:90-96 (in Korean).
- Zhang, W., Y. Cai, C. Tu and L.Q. Ma. 2002. Arsenic speciation and distribution in an arsenic hyperaccumulating plant. Sci. Total n. 300:167-177.

(Received 23 November 2012 ; Revised 24 January 2013 ; Accepted 1 February 2013)